

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

---

# Gellérthegy biofilm minták $\gamma$ -spektroszkópiai vizsgálata

---

*Készítette:*  
**Székely Gellért**  
**Zsombor**  
Fizika BSc

*Témavezető:*  
**Dr. Horváth Ákos**  
Egyetemi Docens  
ELTE TTK Atomfizikai  
Tanszék



2018. május 31.

### **Kivonat**

A dolgozatom témája a Gellért-hegy karsztrendszerében képződött biofilmek vizsgálata, mely biofilmek létezése a már sokat vizsgált Gellért-hegyi radon anomália egyik alappillére.

Ezen biofilmek elemösszetételét, rádium aktivitását és radonexhalációját vizsgáltam meg többféle szempont szerint, illetve hasonlítottam össze korábbi, szintén a Gellért-táróból származó minták mérési eredményeivel, természetesen kiegészítve azokat, ahol szükség volt erre.

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezető</b>	<b>1</b>
1.1. Célkitűzés . . . . .	1
1.2. A radon és a Gellért-hegy . . . . .	1
<b>2. A Gellért-hegyi radioaktivitás korábbi vizsgálatai</b>	<b>3</b>
<b>3. Mérési módszerek</b>	<b>5</b>
3.1. $\gamma$ -spektroszkópia módszere [5] . . . . .	6
3.1.1. High Purity Germanium - HPGe - detektor . . . . .	6
3.2. Röntgenfluoreszcencia-analízis [13], [18] . . . . .	7
3.3. Folyadékszintillációs spektroszkópia [4], [8], [9] . . . . .	10
<b>4. A minták</b>	<b>12</b>
4.1. A minták geometriai adatai . . . . .	15
<b>5. Eredmények</b>	<b>16</b>
5.1. Röntgenfluoreszcencia-analízis . . . . .	16
5.1.1. Kalibráció . . . . .	16
5.1.2. A háttér vizsgálata . . . . .	17
5.1.3. Mérési eredmények . . . . .	18
5.1.4. A pasztillák geometriai viszonyainak tesztelése . . . . .	20
5.2. $\gamma$ -spektroszkópia . . . . .	23
5.2.1. HPGe detektor spektrumok . . . . .	23
5.2.2. Hatásfok és Fajlagos aktivitás . . . . .	24
5.3. Folyadékszintillációs spektroszkópia . . . . .	26
<b>6. Diskusszió</b>	<b>29</b>
<b>7. Köszönetnyilvánítás</b>	<b>30</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>31</b>

# 1. Bevezető

## 1.1. Célkitűzés

Szakdolgozatom célja a Gellért-hegyi táróban található biofilm kiválások radioaktív tulajdonságainak (fajlagos radon kibocsátás, rádiumtartalom, anyagi összetétel) meghatározása, ugyanis korábbi kutatások nyomán valószínűsíthető, hogy ezen biofilmek létezésének következtében alakult ki a Gellért-hegy forrásvizeinek kiugróan magas radontartalma és ezáltal az úgynevezett Gellért-hegyi radon anomália.

A Gellért-hegy és a Budai karsztrendszer termálvizeinek radioaktivitását, a radioaktivitás lehetséges forrását - vagy forrásait - már több szerző is vizsgálta korábban, különböző kutatási céllal. Például a biofilmek feltérképezése a Molnár János-barlangban [2]), vagy a radonkoncentráció időbeli változása a Gellért táróban [23], avagy a radon- és rádiumtartalom lehetséges forrásai [20] vagy akár az ún. északi "langyos" források urán és radontartalmának összehasonlítása ([17]).

Természetesen a lista még folytatható lenne, a lényeg azonban az, hogy ezen dolgozatok munkáját alapul véve kezdtünk bele a saját kutatásunkba, amelynek fő célja kimutatni az összefüggést a biofilmek rádiumtartalma és a radonanomália között.

Kutatásunk során épp ezért használtunk korábbi kutatómunkákból maradt mintákat, vettünk saját mintát is, valamint többféle műszerrel dolgoztunk (ld.: 3. fejezet).

## 1.2. A radon és a Gellért-hegy

Az anomália kutatásához fontos tudni, hogy a természetben található radioaktivitás részben a kozmikus sugárzásból részben pedig a Földön előforduló radioaktív elemek bomlásából származik. Mi most a Földön előforduló radioaktív elemekkel foglalkozunk, amelyek közül kőzeteinkben megtalálhatók a következő elemek:  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$ , illetve leányelemeik. Ezek vagy felhalmozódnak a kőzetek pórusaiban vagy beleoldódnak az ott lévő vizekbe - vagy a kőzetekben felhalmozódván hosszú évek eróziós munkája nyomán oldódnak a vizekbe.

Ezen radioaktív elemek közül az egyik legfontosabb a radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) - amely az urán bomlási sorába tartozó rádium ( $^{226}\text{Ra}$ ) leányeleme.

A radon egy  $\alpha$ -sugárzó nemesgáz, mely a kőzetekből könnyen kiszabadul és 1–10 méterre is diffundálhat. Mivel felezési ideje nagyon rövid, mindössze 3.82 nap, így igen hamar elbomlik és keletkezési helyéről elég messze eljuthat, akár vízben, akár levegőben. [15]

A kutatás folyamán épp ezért mind a Gellért-hegyi karsztvízből, mind a barlang falából vettünk mintát. A minták az úgynevezett biofilmek, azaz baktériumok - élő és elpusztult változatok - csoportosulása, melyek valamilyen határfelületen megtapadva megtelepszenek és felületükön extracelluláris polimer mátrixban képesek rádiumszállításra, radontöbbletet okozván a vizsgált területeken. [2]

A vizsgált terület a Gellért-hegy alatt húzódó barlangrendszer - ún.: Gellért-hegyi táró - forrásai, melyek a Gellért fürdő (Szent Gellért tér) - Lukács fürdő (Erzsébet-híd) között helyezkednek el. Korábbi vizsgálatok alapján először szembetűnő - és anomáliát sejtető - megfigyelés, hogy az átlagosnak tekinthető  $50 \text{ Bq L}^{-1}$  értékről a Diána- Mustafa-forrásoknál illetve az Attila-kútnál, azaz a Rácz-fürdő forráscsoport környékén vizsgált mintákban felszökik  $400 - 600 \text{ Bq L}^{-1}$  értékre a radonkoncentráció. [14], [23], [25], stb.

Az említett Diana-forrás azért is érdekes, mert itt helyben keletkezik a radon, méghozzá úgy, hogy a vas-oxihidroxid - amely a megcsapolódási zónában található - adszorbeálja a rádiumot a forráskilépésnél, melynek hatására a felhalmozódó rádium szolgál a forrásvíz radonforrásaként. [11]

Ezen hévizek leírását - elhelyezkedés, kinézet, pH, tengerszint feletti magasság, hőmérséklet stb. - egyébként már 1968-ban elvégezték a Vízügyi Tudományos Kutatóintézet (röviden: VITUKI) munkatársai [1], így ezzel mi nem foglalkozunk részletekbe menően, pusztán annyit jegyzünk fel a mintákról szóló fejezetben (4. fejezet), hogy melyik minta honnan származik, illetve vázoljuk, hogy milyen elv és szemmel látható tulajdonságok alapján gyűjtöttük be őket.

A kutatás során a minták áttestek egy röntgenfluoreszcencia-analízisen, hogy anyagi összetételüket meg tudjuk határozni s ezzel a hatásfokuk számítását pontosíthatjuk. Továbbá a fajlagos aktivitásuk meghatározásának céljából  $\gamma$ -spektroszkópiának lettek alávetve, valamint végezetül folyadékszintillációs mérés során meghatároztuk a radon exhalációjukat - ezzel együtt természetesen megkapjuk a radon exhalációs együtthatójukat is. A sorrend a folyadékszintillációs mérés esetén volt egyedül fontos - azaz, hogy ez a mérés legyen az utolsó minden mintán - hiszen a szilárd halmazállapotú mintáinkat itt egy folyadékba - szcintillációs koktél - kellett helyezni, amelyet ki lehet ugyan szárítani, viszont a minta aktivitása mindenféleképpen csökken utána, így az módosítaná az eredményeinket.

## 2. A Gellért-hegyi radioaktivitás korábbi vizsgálatai

Melyben tárgyaljuk az előző fejezetnél picit részletesebben azon dolgozatokat és cikkeket, melyek a Gellért-hegyi radonanomáliát illetve a környező területeken előforduló biofilmek jellemzőit vizsgálták előttünk.

Blázsovcics Péter diplomamunkája, aki kutatásának céljával a Molnár János-barlang biofilm mintáinak komplex feltérképezését tűzte ki [2], így a barlang különböző víz alatti pontjaiáról vett mintákat és ezeknek a radon exhalációs együtthatóját valamint az aktivitását vizsgálta. Kutatásának eredménye röviden, hogy a Molnár János-barlang B4-es elnevezésű termében található fekete színű biofilm fajlagos exhalációs értéke sokkal magasabb, mint a többi biofilmé, vagy akár a környező helyeken vizsgáltaké, így valószínűleg más az anyagi összetétele, azonban ahogy a diszkussziójában megemlíti, az anyagi összetételt ő maga nem vizsgálta. A munkája során továbbá vett mintát a Gellért tó XI-es kútjából is és az ahhoz közeli aknából, hogy meghatározhassa az ott található biofilm fajlagos aktivitását és fajlagos (radon-) exhalációját. Ez az a minta melynek maradékát mi is felhasználtuk a kutatásunk egyik részeként.

Péter kutatása számomra abból a szempontból volt mérvadó, hogy én is hasonló módszerek alapján kutattam a Gellért tó területén, annyival kiegészítve az ő módszereit, hogy kétféle műszerrel mértem az aktivitást (ld.: 3.1.1. fejezet), valamint mértem az anyagi összetételt is, amelyet korábban - ha egyáltalán foglalkoztak az anyagi összetétellel - csak az adott kőzet (dolomit, aragonit, mészkő, stb.) vagy minta (biofilm egy adott anyagú barlangból, kalcitlemez, stb.) alapján határoztak meg.

Kurcz Regina diplomamunkája, aki a Budai-hegység északi részének felszín alatti vizeiben vizsgálta a radionuklid tartalmat [17], tette mindezt általános vízkémiai elemzéssel, radon-tartalom mérésével valamint urántartalom méréssel. Kutatómunkájának számunkra érdekes eleme, hogy az általa mért terület forrásvizeinek és kút vizeinek a radontartalma csak a Rómaifürdő kútjaiban tér el az ezen a területen átlagosnak tekinthető maximum  $10 \text{ Bq L}^{-1}$  értéktől, sőt ezek között is van kiugró érték: a IV. és az V. számú források radontartalma magasabb, mint  $100 \text{ Bq L}^{-1}$ . Ez után összehasonlította a saját mérési eredményeit (2013-ban történtek) az előtte ugyanitt méréseket folytató Kis-Csitári Teréz eredményeivel (2010-es mérések), melyből megállapítja, hogy a radontartalmak a mérések hibahatárán belül változnak a legtöbb forrás esetében, kivételt egyedül az amúgy is igen magas radonkoncentrációs értékkel rendelkező Rómaifürdő V.-forrás eredményei képeznek, tehát valószínűsíthető ott egy hely radonforrás, azaz egy  $^{226}\text{Ra}$  dúsulás. Ebben a forrásban továbbá

a korábbi mérés jóval magasabb értéket mutatott, amely főleg azért érdekes, mert a legtöbb forrásnál a későbbi mérés mutatott kicsivel magasabb értékeket.

Konklúzióként mindössze annyit olvashatunk, hogy valószínűleg az okozta az eltérést ezen forrás esetében, hogy a korábbi mérés november hónapban történt, ő pedig márciusban végezte a méréseit. Sajnos további okfejtés nem történt a témában, minket pedig ez az időbeli eltérés pusztán abból a szempontból érdekel, hogy az aragonit barlangban begyűjtött, a színe és elhelyezkedése alapján a többinél idősebbnek gondolt mintánk értéke vajon fog-e eltérést mutatni a többitől.

Palotai Márton et al. 2005-ös cikkben a szerzők a Gellért-hegy északi részének - Rudas-fürdő forrásaival a középpontban - forrásvizeinek radon- és rádiumtartalmát vizsgálják [20], hipotézisükben a Rudas-fürdő forrásainak kiemelkedően magas értékeit egy, a fürdő alatt húzódó még fel nem tárt és egy, a forráskilépést előidéző szerkezeti elem együttes hatásával magyarázzák. A cikk átfogó eredményeket közöl a Gellért-hegy alatt húzódó Gellért táró forrásainak radon- és rádiumtartalmáról, valamint hasonló okokból foglalkozik a József-heggyel is, de minket az előbbi érdekel főleg. Részletezik, hogy a Gellért-hegy vizeinek radontartalma a csapvízben található radontartalom tíz-tizenötszöröse, azon belül is kiemelkedik a Rudas-fürdő környéki források radontartalma, mely a Gellért-hegyi terület átlagértékénél 10 – 20%-kal magasabb, sőt ezen értékek már országos szinten is kiemelkedőnek számítanak.

A szerzők Gellért-hegyi forrásoknál fellépő anomália okaként egy "extra" forrást feltételeznek, melyen a víz áthalad, így képezvén a radontöbbletet. Valószínűsítik, hogy ez egy vízből kivált rádiumforrás. A Gellért-hegy környékén egy korábbi cikk [24] alapján valószínűsíthető volt eddig is, hogy a magas radioaktivitás oka a rádiumdús iszap. Továbbá általános érvényű megoldás a radon felszín alatti vizekbe való bejutásának problémájára ekkor - 2005-ben - még nem született - de azóta Mádlné Szőnyi Judit kutatásai alapján nagyon valószínűsíthető a biofilmek általánosan fontos szerepe a Gellért-hegyi radon anomáliában. Valamint azt is fontos kiemelni a cikkből, hogy a pontszerűnek tekinthető mérési eredményeket kritikával kell kezelni, hiszen a radontartalom mértéke időben és területileg is nagyon változékony.

A szerzők levonják a következtetéseket, többek között arról, mely szerint a Gellért-hegy gyomrában lévő források mellett szükségszerűen kell lennie helyi radon- és rádiumforrásnak is. Feltételeznek egy változó mértékben, de mindenhol - a térségben - jelenlévő radioaktív háttérforrást, melyet az úgynevezett Tardi Agyagban jelenlévő ásványoknak tulajdonítanak.

Ami számunkra ebből fontos lehet, az az ásványkiválás, amiről a szerzők csak igen röviden írnak, valamint, hogy a rádium- és radontartalom a Gellért-fürdő felől a Rudas-fürdő felé nő, tehát a mi mintáinkban is - elvileg - kimu-

tatható kell legyen eltérés, hiszen az aragonit barlang jóval közelebb helyezkedik el a térség - a cikk szerinti - legalacsonyabb radontartalmú forrásához, az Ósforráshoz, mint a táró zsompjai, amelyek mellől a kifolyó mederből mintát vettünk.

Resch Anita diplomamunkájában a Rudas fürdő-források csoportjában Attila-, Hungária- és Juventus-kutak vizeinek radontartalmának időbeli változását vizsgálta [23], továbbá azt, hogy mennyire korrelál a három idősor egymással és a Duna vízállásával. Számunkra ez nem lenne túl érdekes, azonban a diplomamunkájának mellékcéljává azt tűzte ki, hogy a Gellért táró hozzáférhető vizeinek, valamint a Gellért-hegy levegőjének a radontartalmát is meghatározza. Kutatómunkájának ezen része során először bejárta a Gellért-hegyi tárót - az aragonit barlanggal együtt - melyről részletes leírást olvashatunk a 3.3.2-es fejezetben. Továbbá nem csak víz- hanem kőzetmintákat is gyűjtött a táróban és ezek radon exhalációját is mérte, azonban másfajta módszerrel, mint amivel én mértem a saját mintáimat. A módszer pontos leírását a diplomamunkájának 5.5. fejezetének Radon-exhaláció mérése című bekezdésében tárgyalja. Összefoglalásként leírja, hogy az aragonit barlang falának rádiumtartalma nem számottevően nagy, viszont az Ósforrás felszínéről gyűjtött és vizsgált kalcitlemezek fajlagos aktivitása az átlaghoz képest nagyon magas.

Én pedig ennek nyomán vizsgáltam az aragonit barlang falait pusztán kézzel elérhető magasságnál magasabban is - itt találhatóak a 4. fejezetben is tárgyalt piros színű lerakódások - hogy hátha azért kaptak ilyen alacsony értéket, mert fiatal mintát vizsgáltak - amely ugye a fal felső rétege, tehát a belőle diffundáló radon nem a felette levő réteg radontartalmát, hanem a levegőjét dúsítja. Valamint a zsompok melletti mederből is emiatt gyűjtöttünk kalcitlemezeket, mivel ama meder és az Ósforrás vize nincs közvetlen kapcsolatban, így ha ott is kimutatható a kalcitlemezek magas rádiumtartalma, akkor valószínűsíthetően egy, az egész Gellért-hegyet átfogó jelenségről van szó, amely szerves részét képezi a vizsgált radon anomáliának.

### 3. Mérési módszerek

Melyben arról lesz szó, hogy a mintáinkat többféle mérőműszerrel vizsgáltuk, hogy meghatározzuk például a mintát alkotó anyagokat, amely a későbbiekben hasznunkra válik majd a határfok számításnál, vagy akár a célból, hogy részletesebben - magasabb és alacsonyabb energiatartományban - is megmérjük a minták aktivitását.



### 3.1. $\gamma$ -spektroszkópia módszere [5]

Célunk, hogy meghatározzuk a minta rádiumtartalmát, melyhez az alábbi képlet segít minket hozzá:

$$A = \frac{T}{\epsilon * t * \eta} \quad (1)$$

ahol  $A$  a minta aktivitása,  $T$  a minta spektrumában az adott energiájú csúcs - esetünkben 186 keV - területe,  $\epsilon$  a relatív intenzitás, értéke 0.0328 [7],  $\eta$  pedig a hatásfok - hatásfok kiszámításáról a 5.2.2. fejezetben lesz szó.

Térjünk vissza a  $\gamma$ -spektroszkópiához, melynek lényege, hogy a részecske által a detektor anyagával való ütközéskor leadott, a detektor érzékeny térfogatában maradt energiát mérjük. A tárgyalt kölcsönhatások a Compton-szórás, a fotoeffektus valamint a párkeltés.

Ezen kölcsönhatások mindegyikénél keletkezik egy vagy kettő részecske, mely egyetlen töltéssel rendelkezik és mozgási energiája a sokszorosa a detektor atomjaiban lévő elektronok kötési energiájának, s ahogy végighalad a detektorban, létrehoz bizonyos mennyiségű elektronhiányt (elektron-lyuk párokat). Egy ilyen "pár" létrehozásához mindössze néhány eV energia szükséges és így egy meglökött elektron vagy pozitron akár  $10^5 - 10^7$  "párt" is létrehozhat - a leadott energiájával arányosan.

Ez az a töltésmennyiség, amelyet meghatározunk a keletkezett töltések bizonyos idő alatti begyűjtésével. A mérés egy ezreléknél is jobb pontossága - az ún. felbontás - pont a nagy, így statisztikailag kevésbé fluktuáló, számú elektronhiány létrehozásának köszönhető.

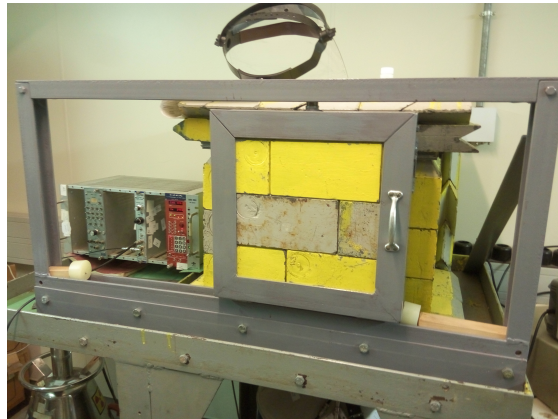
A  $\gamma$ -spektroszkópiai mérésekhez egy úgynevezett nagy tisztaságú germánium detektort használunk (ld.: 3.1.1. fejezet).

#### 3.1.1. High Purity Germanium - HPGe - detektor

A detektor a 1.ábrán látható, energia-felbontóképessége 1 MeV energiánál 1 - 2 keV. A mérés során beütéseket számlálunk tulajdonképpen, melyek úgy keletkeznek, hogy minden keletkezett foton, mely eltalálja a detektort, ott le is adja az energiáját és elektromos impulzust generál, melyet egy spektroszkópiai erősítő felerősít és megformáz. Ez után egy néhány volt amplitúdójú, rövid jelet kapunk.

A detektorra egyébként nagyfeszültség van kapcsolva, azért, hogy elkerüljük a rekombinálódást, illetve ennek segítségével a lyukak az anódra, az elektronok a katódra gyűlnek, így hozván létre az áramimpulzust. Annak érdekében, hogy csak pusztán a feszültség miatt, radioaktív sugárzás hiányában is legyen áram, a detektort egy rúd végére helyezük, mely rézrúd másik vége  $-196^\circ$ -os folyékony nitrogénes tartályban van hűtve. A réz jó ve-

zetőképességének köszönhetően a detektor is hűtve van. Természetesen nagy áram érzékelése esetén a detektor kikapcsol - így ha elpárologna az összes nitrogén, akkor sem történne súlyos anyagi kár - csak az aktuális mérésünk veszik oda.

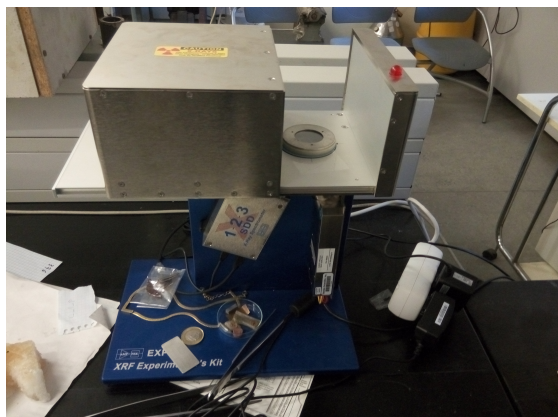


1. ábra. HPGe

Az ábrán a műszer becsukott állapotban, mérés közben látszik.

### 3.2. Röntgenfluoreszcencia-analízis [13], [18]

Az RFA műszer (2. ábra) egy Amptek gyártmányú röntgenfluoreszcencia-analizátor, mely néhány keV energiájú fotonokat bocsát ki, így a minta elem-tartalmát - azaz, hogy milyen elemekből tevődik össze a minta - lehet vele vizsgálni. A mérés során karakterisztikus röntgensugárzással dolgozunk és a minta atomjainak legbelső elektronját ütjük ki. A röntgensugarak a mintába behatolva ütköznek az elektronokkal és energiájukat nekik teljesen átadva megsemmisülnek. A legbelső elektron kiütésének okát az energia- és impulzusmegmaradás törvények kötelező érvényesülésében találjuk. Természetesen előfordulhat a fotoeffektuson kívül még Compton-szórás vagy szekunder gerjesztés is, azonban ezek részletes tárgyalása a dolgozatom szempontjából lényegtelen.



2. ábra. RFA

Fontos még a karakterisztikus röntgensugár elnevezése, azaz, hogy mi alapján lesz  $K_\alpha$ ,  $K_\beta$ , stb. A magyarázat pedig az, hogy attól függően, hogy melyik héjről ütjük ki az elektront, kapja a sugárzás a  $K$  (legbelső, vagy első héj),  $L$  (második héj), stb. elnevezést - a  $K$  típusú sugárzás fotonjai a  $K$ -fotonok, az  $L$ -é pedig értelemszerűen az  $L$ -fotonok. A görög betűkkel pedig azt szokás jelölni, hogy a létrejött lyukba melyik magasabb pályáról töltődik be ( $\alpha$ , ha az egyel magasabbról,  $\beta$ , ha a kettővel magasabbról, stb.). Fontos még a gyakoriságviszonya az egyes átmeneteknek, hiszen ha például azonos lenne az összes, akkor nem tudnánk azonosítani ilyen egyszerűen az elemi összetevőket. Szerencsére a  $K_\alpha$  sokkal gyakoribb a  $K_\beta$ -nál - ennek oka a pályák különbözőségében keresendő - míg az  $L$  átmenetek esetén ez a gyakoriság általában közel azonos a három leggyakoribb ilyen típusú átmenetre ( $L_\alpha$ ,  $L_\beta$ ,  $L_\gamma$ ), így a  $K$  és  $L$  típus könnyen megkülönböztethető egymástól.

Sugárforrásunk a képen - 2. ábra - is látható röntgengenerátor, melyben a röntgenszó gyorsítófeszültsége és árama is állítható (50 – 200 kV illetve 5 – 200  $\mu$ A). A karakterisztikus röntgenfotonok energiája pedig 3 – 100 keV között van. A leírás szerinti optimális beállítás 35 keV és 10  $\mu$ A).

A mintát biztonsági okokból mindig egy alumíniumgyűrűre feszített *mylar* fóliára helyezzük az alsó védőfólia fölé.

A detektorunk egy SDD (Silicon Drift Detector) mely a minta alatt helyezkedik el. A detektorba beérkező fotonok gerjesztik a szilícium egykristályt és a leadott energiájuk azonos számú elektron-lyuk pár keltésére fordítódik. Ezeket a félvezetőre kapcsolt záróirányú feszültség kitereli az elektródokra, ezért a beütést egy áramimpulzus követi, mely nagyon kicsi időbeli kiterjedéssel rendelkezik - körülbelül mikroszekundumos a nagyságrendje - tehát a jobb vizsgálhatóság érdekében egy jelformáló egységen is átmegy, amely a jeleket is korrigálja, így minden beütésünk azonos lesz alakilag. A jeleket

végül egy *ADC* konverterrel alakítjuk egész számmá, mely 1 és 1028 között van. Ez a végeredmény, melyet csatornaszámmak nevezünk.

Továbbá nagyon fontos megvizsgálni a korábban leírtak alapján azt is, hogy amit detektálunk, az most *K* vagy *L* csúcs. Ennek két módszere van, az első - ami általában azért működik is és viszonylag könnyű - hogy ránézésre megmondjuk, hiszen az eddig tárgyaltakból kiderült, hogy a két különböző típusú karakterisztikus röntgensugárzás igen eltérő csúcsokat eredményez. Természetesen, ha ez valamilyen oknál fogva nem lenne egyértelmű, meg amúgy is mindent minimum kétszer ellenőrzünk, ha úgy érezzük, hogy a detektált csúcs *L* típusú pedig inkább *K*-ra hajaz, akkor elővesszük a táblázatunkat [6] és megnézzük az ott szereplő megfelelő értékeket. A méréseink során ezt többször alkalmaztuk, de mindig arra a következtetésre jutottunk, hogy a mért csúcsok pusztán  $K_\alpha$ -k és  $K_\beta$ -k, mert magasab rendszámú elemek - melyeknek  $K_\alpha$ -it és  $K_\beta$ -it az adott, maximum 50 keV-es tartományú méréseinkkel nem tudnánk detektálni és amelyek  $L_\alpha$ ,  $L_\beta$  és  $L_\gamma$  röntgensugarainak energiái pont a mért tartományukba esnek - azért nem lehetnek, mivel az adott elemhez tartozó két csúcs - és úgy összességében az összes csúcs - karakterisztikája eltérő, tehát nem hasonlíthatnak egymáshoz nagyon-nagyon, azaz különböznek.

Egyedül egy esetben merült fel komolyan ez a kérdés, mégpedig a vas 6.403 keV energiájú  $K_\alpha$  és 7.057 keV energiájú  $K_\beta$  csúcsainál, amelyek kis pontatlansággal, de lehetnének a diszproziium (*Dy*) 6.495 keV energiájú  $L_\alpha$  és 7.249 keV energiájú  $L_\beta$  csúcsai. Viszont két okból is kizárandóak, az egyik, kevésbé meghatározó ok, hogy általában az *L* csúcsok mindhárman együtt szoktak szerepelni, azaz itt jelen esetben hiányzik a 8.418 keV energiájú  $L_\gamma$  csúcs, valamint - és ez a fő ok - hogy a háttérmérés során is detektálható volt ez a két csúcs, s ez sokkal inkább tudható be a mérést borító fém doboz vastartalmának, mintsem a mintánk diszproziium vagy akár a fém doboz diszproziium tartalmának. Természetesen 100%-os meggyőződéssel csak akkor állíthatnánk ezt, ha képesek lennénk 50 keV-nél magasabb energiákon is elvégezni a mérést, ugyanis a diszproziium  $K_\beta$ -jének energiája már ezen érték felett van - egyébként a  $K_\alpha$ -jének az értéke is kevesebb, mint 5 keV-al marad el tőle.

Minden használat előtt lemértem a kiadott próba mintákat (egy szennyezett rézlemez és a 316 SS elnevezésű fémlap), amelyek alapanyagai ismeretek, így meghatározható, hogy éppen milyen tartomány vizsgálatára van kalibrálva a műszer és adott esetben átkalibrálható. A kalibrációs mérések eredménye az 5. fejezetben van részletezve.

### 3.3. Folyadékszintillációs spektroszkópia [4], [8], [9]

A radon exhalációs együttható meghatározását folyadékszintillációs spektrométer segítségével, egy Tri-Carb 1000 TR műszerrel végeztük.



3. ábra. Tri-Carb Liquid Scintillation Counter

Mérés előtt a mintákat koktélba helyezük, mely úgy néz ki, hogy 2 g tömegű mintához adunk 8 ml desztillált vizet és 10 ml OPTI-FLUOR-O-t.

A folyadékszintillációs módszer lényege, hogy meghatározzuk a percenkénti radonatom kibocsátást a mért idő alatt.

A koktélban elbomlott radonatomok percenkénti számára kapott cpm értékeket természetesen szeretnénk  $\text{Bq L}^{-1}$  értékekké konvertálni, ehhez a kalibrációs minta lemerésénél kiszámolt formulát alakítjuk majd át, amely egyébként:

$$c = \frac{\text{cpm} - 12.1}{1.98} \quad (2)$$

ahol  $c$  a minta aktivitás koncentrációja - mértékegysége  $\frac{\text{Bq}}{\text{L}}$  - a 12.1 a kozmikus háttér jelenlétét figyelembe vevő konstans, míg az 1.98 pedig kalibrációs konstans. [10]

Az átalakításra azért van szükség, mivel a kalibrációs mintánál a folyadékszintillációs koktél alatt folyadék ( $\text{RaCl}_2$ ) volt, így a mérés során rögtön detektálhatóvá vált az  $\alpha$ -bomlás következtében keletkező radon, valamint a radonból  $\alpha$ -bomlással keletkező polónium (a pontos bomlási sort ld.: <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>, [22]), így a radon leányelemeinek  $\gamma$ -sugárzása a háttérsugárzással együtt egy konstansal számolható. A bomlási sor a mérések rövid időtartama és a  $^{210}\text{Pb}$  felezési idejének (21 év) a mérési időhöz viszonyított óriási hossza miatt csak eddig - a  $^{210}\text{Pb}$ -ig - érint minket.

Viszont, mivel a leányelemek között megtalálható  $^{214}\text{Pb}$  és  $^{214}\text{Bi}$  valamint  $^{214}\text{Po}$  felezési ideje 26.8 és 19.8 perc valamint  $1.62 * 10^{-4}$  másodperc és a mintánk szilárd halmazállapotú - tehát mikor a szcintillációs koktélba bekeverjük, előbb még a vízbe kell diffundálnia a radonnak és utána tudja csak gerjeszteni az OPTI-FLUOR-O-t - ezért a leányelemek bomlásából származó  $\gamma$ -bomlást külön bele kell számolnunk a cpm-ről  $\text{Bq L}^{-1}$ -re való áttéréskor.

A képlet emiatt az alábbira módosul:

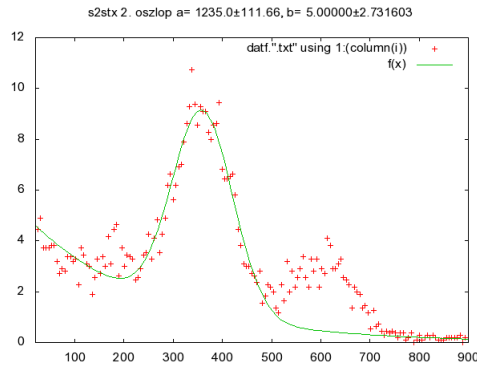
$$c = \frac{cpm - cpm_{\gamma} - \frac{12.1}{X}}{\frac{1.98}{Y}} \quad (3)$$

ahol a cpm a megmért minta  $\frac{\text{beütés}}{\text{perc}}$  értéke, a  $cpm_{\gamma}$  a megmért mintában lévő leányelemek  $\frac{\text{beütés}}{\text{perc}}$  értéke. Továbbá X egy konstans, mely a  $\frac{12.1}{X}$  hányadosba beírva megadja az háttérsugárzás megfelelő hányadának értékét annál a csúcsonál, ahol az 5.5 MeV energiájú  $^{222}\text{Rn}$  és a 6.0 MeV energiájú  $^{218}\text{Po}$  átfednek. Y pedig az a konstans, amellyel a kalibrációs konstansot kell leosztani, hogy a korábban ismertett ablakban vizsgálódván a megfelelő értéket kapjuk.

Ezt a teóriát boncolgatva, azaz, hogy módosul a vizsgált tartomány is, a legnagyobb, nagyjából 200 – 500 keV között elhelyezkedő csúcs területére, illetve módosul a háttér értéke is, a korábban tárgyaltak miatt, jutottunk arra a gondolatra, hogy mi történne, ha egy konstansal, valamint egy plusz exponenciális lecsengésű taggal kiegészített Gauss-függvényt illeszténék a kapott értékeinkre. Ezzel a háttérbe beledefiniálhatnánk a  $cpm_{\gamma}$ -t, s így az ablak területének kiszámítása is könnyebbé válna. Ezen analógián végigmenve az alábbi képlethez jutottunk el:

$$c = cpm_T * 2,193 \quad (4)$$

ahol  $cpm_T$  a vizsgált csúcstra illesztett Gauss görbe területe osztva a mérési idővel, a 2,193 pedig az a konstans, amibe minden nem- $\alpha$ -sugárzás bele van definiálva. Az illesztés eredménye a 4. ábrán látható.



4. ábra. A standard radonforrás fényhozam spektrumának illesztése

Újjonnan készített küvetta esetén a mért radonkoncentráció időben nő, az exhaláció miatt. Ennek az időfüggését szeretnénk most meghatározni, mely egy kétlépcsős differenciálegyenlet megoldásával lehetséges. A kapott összefüggés, mellyel a mi esetünkben a radonexhaláció kiszámítható:

$$c(t) = A * \left( \frac{\alpha}{\beta} + \frac{\alpha}{\alpha - \beta} * e^{-\alpha * t} - \frac{\alpha}{\beta} * \frac{\alpha}{\alpha - \beta} * e^{-\beta * t} \right) + D \quad (5)$$

ahol  $A$  egy illesztési paraméter,  $\alpha = \frac{\ln 2}{\gamma}$ ,  $\beta = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ ,  $\gamma$  a diffúzió karakterisztikus ideje és  $D$  egy konstans, amibe beledefiniáltuk a háttérrel.

## 4. A minták

Kutatásunkhoz a mintákat a Gellért-hegyi táró barlangjaiból, illetve a táróból magából vettük, továbbá korábbi vizsgálatok tárgyát képező mintákat is felhasználtunk, hogy reprezentatívabb képet kapjunk a területről.

Mintavételhez nejlonzacskókat és a puszta kezünket használtuk a témavezetőmmel. A reprodukálhatóság végett a folyamat során igyekeztünk egy adott területről a lehető legtöbb, szükséges mennyiségű mintát begyűjteni, amennyi elért a nejlonzacskóban.

Egy adott területrészen belül - pl.: aragonitbarlang - próbáltunk minél jobban megkülönböztethető helyekről mintát venni, hogy amennyiben van különbség a földrajzi és vízszint feletti magasságbeli elhelyezkedésben ilyen szűk környezetben belül, akkor az könnyebben kimutatható legyen.

Egy korábbi kutatás [2] két mintáját is felhasználtuk a vizsgálatokhoz, alább ezek is részletezésre kerülnek.

Régi minták:

- GTBP1AM (GT - Gellért táró, BP - Budapest, 1 - 1-es minta, A - A pont, M - mozsárral törve)
- GTBP1B (mint az előző, de a B ponton véve)

továbbá a mozsárral nem megtört GTBP1B mintából gyártottunk saját mintapasztillákat, illetve az RFA-n való vizsgálhatóság érdekében az egyik mintából saját készítésű dobozba öntöttünk port:

- GTBP1AMkisdoboz - saját gyártású papírdobozba zárt porminta az AM mintából
- GTBP1BPN - nagy pasztilla a B mintából
- GTBP1BPK - kis pasztilla a B mintából

illette vettünk saját mintákat is 2018.04.11-én, a Gellért táróban (GT) található aragonitbarlang (AB) falából - az aragonit akkor keletkezik, amikor a kalcium-karbonát ( $\text{CaCO}_3$ )  $27^\circ$  felett kristályosodik ki. Az aragonitbarlang a Gellért-táróból nyílik, a Gellért fürdőben lévő lejárattól nagyjából 50 méterre. A mintákat a barlang kivilágított, első részéből vettük, három ponton.

Az egyik minta (a GTAB2) a barlang szemmel láthatóan fiatal, sárga színű aragonit falából van, míg a másik két minta a piros színű falréteg különböző pontjairól. Annak okán vettük így a mintákat, hogy tesztelhessük, a piros színű, sok száz évvel öregebb réteg valóban több rádiumot tartalmaz-e (s így magasabb a radon exhalációs értéke).

- GTAB1 - 5 méter magasról
- GTAB2 - Derékmagassából (kb 1 méter magasról)
- GTAB4 - 3.5 méter magasságból

A következő mintákat pedig a Gellért táró (GT) vízvezetőjéből (a - alagút) vettük. A táró vízvezetője a nevének megfelelő cél mellett a termál-vízben található biofilm minták kiszárítását is szolgáló, mesterségesen kialakított meder. A mederből vett minták a táróban található úgynevezett zsompok közül az első és a második zsomp közötti részről kerültek ki melyek közül a GTA4 minta magas tisztaságú kalcitlemez minta - a kalcitlemez úgy jön létre, hogy a biofilm felszínére törő vizes kalcitoldatok megszilárdulnak a víz elpárolgásával. A mintavételkor bekerült szennyeződések pasztillálás során eltávolítottam a mintából finom csiszolással, amennyire lehetett.

- GTA1 - a 42. lámpa alól, közvetlenül a második zsomp <sup>1</sup>mellől



- GTA2 - a 41. lámpa alól
- GTA4 - közvetlenül az első zsomp mellől

A zsompok a táróban található folyadékgyűjtő meder folyadékgyűjtő aknáí.

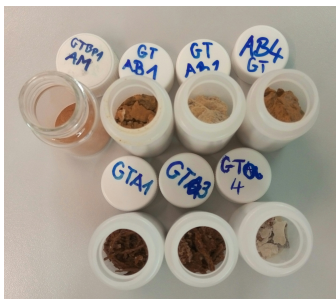
Az alábbi táblázatban látható, hogy mely módszerekkel mértük meg mely mintákat. Itt - is - különbséget teszünk a HPGe és a SiLi detektorokkal való mérések között. A táblázat a mérések napját tartalmazza. A radon exhaláció mérést R-Ex rövidítéssel jelöltem.

A minták	HPGe	SiLi	RFA	R-Ex
GTPB1AM	2017.12.07.	2018.03.13.	2018.05.20.*	-
GTBP1BPN	2017.12.13.	2018.03.09.	2018.03.16.	-
GTBP1BPK	2018.03.09.	2017.12.13.	2018.03.16.	-
GTAB1	2018.04.23.	2018.04.25.	2018.05.20.*	2018.05.26.
GTAB2	2018.04.25.	2018.04.18.	2018.05.20.*	2018.05.28.
GTAB4	2018.05.08.	2018.05.02.	2018.05.20.*	2018.05.28.
GTA1	2018.05.18.	2018.04.23.	2018.05.20.*	2018.05.25.
GTA3	2018.05.20.	2018.05.08.	2018.05.20.*	2018.05.26.
GTA4	2018.05.21.	2018.05.16.	2018.05.20.*	2018.05.28.

1. táblázat. A minták különböző méréseinek időpontjai

Az 1. táblázatban a \*-al jelölt minták a röntgenfluoreszcencia analízis mérésen pasztilla formában estek át, melyhez a pasztillákat 2018.05.02-án készítettem el.

A vizsgált minták eredeti állapotukban küvettákban (5.ábra), valamint a pasztillák (6.ábra):



5. ábra. A küvetták



6. ábra. A paztillák

Az ábrán balról jobbra az alábbi sorrendben láthatóak a minták paztillái: GTBP1AM, GTBP1AMkisdoboz, GTBP1BPN, GTBP1BPK, GTAB1, GTAB2, GTAB4, GTA1, GTA2 és GTA4.

#### 4.1. A minták geometriai adatai

Mivel a  $\gamma$ -spektroszkópiánál történő hatásfok számolásnál 5.2.2 jelentős szerepe van a minták sűrűségének ( $\rho$ ) ezáltal a minták sugarának ( $r$ ), tömegének ( $m$ ) és magasságának ( $h$ ), így méréseim során ezen adataik megmérésére is sort kerítettem.

A minta neve	Átmérő (cm)	Magasság (cm)	Súly (g)
GTA1	2,695	2,35	4,752
GTA3	2,67	2,63	7,1608
GTA4	2,69	0,79	1,2814
GTAB1	2,665	2,415	8,441
GTAB2	2,66	3,19	11,2667
GTAB4	2,68	4,095	7,152
GTBP1AM	2,745	0,84	2,7202
GTBP1BPK	1	0,32	0,5024
GTBP1BPN	1	1,355	1,6893

2. táblázat. A minták geometriai adatai

Ezen adatokból számolható a minták sűrűsége (ld.: 4 táblázat). A minták cm-es adatait tolómérővel, a minták súlyát analitikai mérleggel mértem. A mérleg hibája 0,00005 g esetünkben elhanyagolható, a tolómérő hibája pedig 0,0005 cm, így azt is elhanyagolhatónak tekintjük.

## 5. Eredmények

### 5.1. Röntgenfluoreszcencia-analízis

Ebben az alfejezetben a minták anyagi tartalmának meghatározásáról lesz szó, melynek módszerét a 3. fejezetben ismertettem. A használt mintákat a 4. fejezetben írtam le. A mérések kiértékeléséhez az ELTE TTK Atomfizikai Tanszék által készített táblázatot használtam [6].

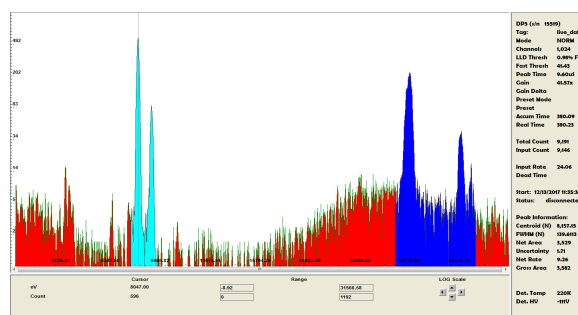
#### 5.1.1. Kalibráció

Ahogy már a mérési módszerek részben (3.2) említettem, a mérést minden esetben kalibrációval kötelező kezdeni, a kalibrációhoz változatos mennyiségű és anyagú minta áll rendelkezésre, én ezekből a szennyezett rézlemez és a 316 SS nevé mintát használtam. A műszerrel két különböző nap mértem - 2018.03.16. és 2018.05.20 - először szerepeljenek itt az ezen két nap kalibrációs méréseinek eredményei.

##### A szennyezett rézlemez



7. ábra. A szennyezett rézlemez



8. ábra. A szennyezett rézlemez grafikonja

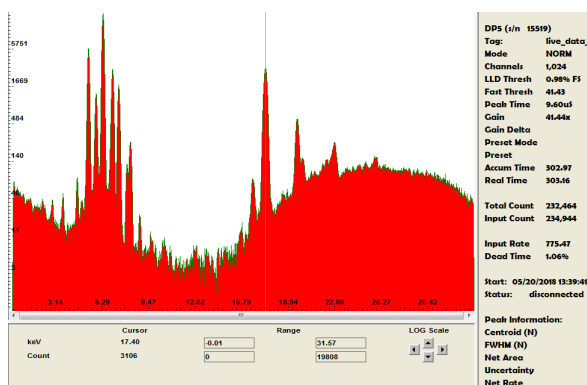
A 8. ábrán szépen látható a világoskékkel jelölt  $Cu - K_{\alpha}$  és  $K_{\beta}$  - csúcsok mellett megjelennek a sötétkékkel jelölt  $Sn K_{\alpha}$  és  $K_{\beta}$  csúcsai is.

##### A 316 SS fémlemez

Egy keverék anyagú lemez, mely a labort 2018.04.13-ai nyugdíjazásáig tartó Dr. Pávó Gyula elmondása alapján molibdént és krómot tartalmaz - de főleg molibdént.



9. ábra. A 316 *SS* fémlemez



10. ábra. A 316 *SS* fémlemez grafikonja

A 10. ábrán megtekinthetjük a vizsgált fémlapunk grafikonját, melynek a függőleges vonallal jelölt csúcsa a molibdén (*Mo*), ezen kívül látható még króm (*Cr*), nikkel (*Ni*), ezüst (*Ag*) és vas (*Fe*).

Mivel a fémlap elvileg csak krómot és molibdént tartalmaz, így volt értelme háttérvizsgálatot végezni, melyről a következő alfejezetben lesz szó.

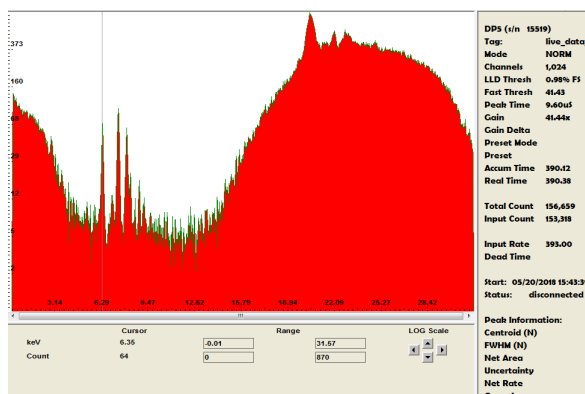
### 5.1.2. A háttér vizsgálata

A kalibrációkon és a kiértékeléseken kívül még egy fontos dolgot el kellett végezni az *RFA* műszer használatakor, ez pedig a háttérvizsgálat, ugyanis ez az a mérés, amelynek segítségével - a kalibrációs mérés mellett - biztosak lehetünk abban, hogy mely csúcsok azok, amelyek detektálódnak, mégsem a vizsgált mintánkból származnak.

Ezen méréshez egy paraffindarabot vizsgáltam (11. ábra)



11. ábra. A paraffin (b) és a vizsgált darabja (j)



12. ábra. A paraffin grafikonja

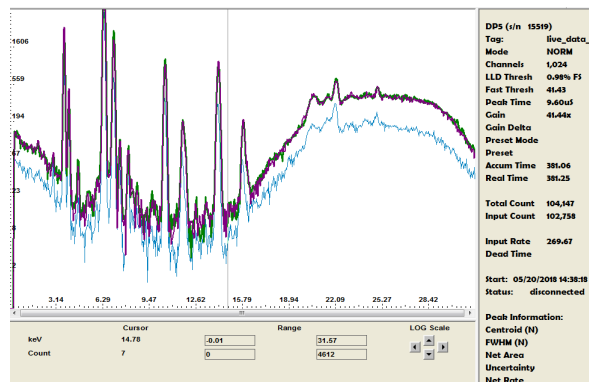
Látható, hogy a paraffin [19], mely telített szénhidrogének tisztított keveréke ( $C_nH_{2n+2}$ ), nem tartalmazhat olyan anyagot, amelyet mi ki tudnánk mutatni a műszerünkkel, így tehát minden, ami kimutatható, az háttérnek tekinthető.

Épp ezért a vas, nikkel és ezüst, melyek egyébként több mérésnél is megjelennek - kivéve ha éppen árnyékolva [13] vannak - a mérési háttérünknek tekinthetők a további méréseknél - és természetesen a kalibrációs mérésnél - is.

### 5.1.3. Mérési eredmények

A 4. fejezetben volt szó arról, hogy a mintákat pasztilla formájában vizsgáltuk az RFA-műszerrel, a mérési módszereket pedig a 3. fejezetben tárgyaltam.

Itt most egy-két általam vizsgált mintának a grafikonját szeretném bemutatni és azokat elemezni. Először a régebbi kutatások hátrahagyott mintáit (13.ábra).



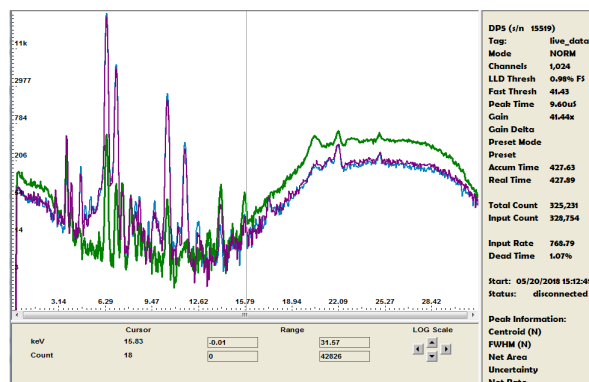
13. ábra. A Blázsovcics féle kutatásból maradt minták elemzése

A kék (későbbiekben csak k) görbe a GTBP1AM mintáé, a zöld (későbbiekben csak z) a GTBP1BPN, míg a lila (későbbiekben csak l) a GTBP1BPK mintáé. Mindhárom mintában kalcium, arzén és stroncium detektálható - természetesen a vas és a nikkel a háttérből származnak.

Sajnos a Blázsovcics féle kutatómunka [2] során nem került deklarálásra, hogy területileg mekkora eltérés van a két különböző pontról vett minta között, így egyelőre csak annyit feltételezek, hogy a biofilmek anyagi összetétele között nagy eltérés várhatóan nem tapasztalható. Főleg, ha ezek nagyjából azonos területen lettek begyűjtve.

Szerencsére saját mintáim vizsgálata erről adhat pontosabb képet, hiszen az Aragonitbarlangban egymás két-három méteres környezetén kívülről lettek véve a minták, sőt a folyadékgyűjtő medrében is méteres távolságok voltak a mintagyűjtési pontok között. Illetve a barlang és a folyadékgyűjtő 1. és 2. zsompja egymástól minimum 500 m távolságra van.

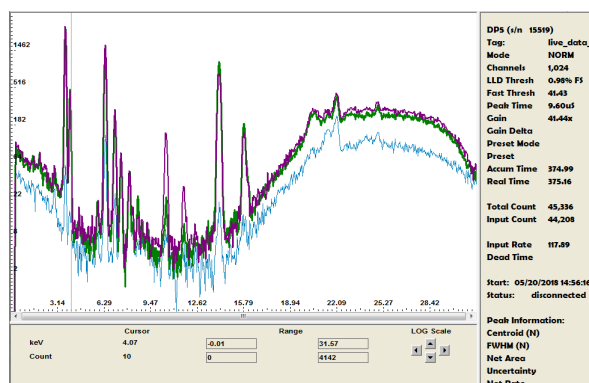
Vizsgáljuk meg az aragonitbarlang mintáit (14. ábra).



14. ábra. Az aragonitbarlang mintáinak elemzése

Látható, hogy a semlegesnek vélt GTAB2 (z) - mely a tiszta, sárga színű falrészről lett véve - és a piros - öregebbenk vélt részről vett - GTAB1 (l) és GTAB4 (k) anyagi összetétele is azonos, a háttérből származó vas csúcsain kívül kalciumot, arzént és stronciumot detektáltam.

Feltételezhető tehát, hogy a Gellért táró biofilmjei ezen anyagokból tevődnek össze, természetesen a nem detektálható *C*-n (szén) és *O*-n (oxigén) kívül. Nézzük még meg a zompok medréből származó mintáinkat (15. ábra).



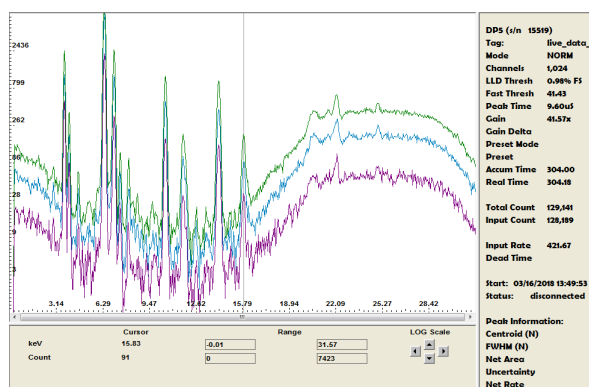
15. ábra. A folyadékgyűjtő mederből származó minták elemzése

Az ábrán a majdnem tiszta kalcitlemezekből álló GTA4 minta (z) valamint a GTA1 (k) és GTA3 (l) minták anyagi összetételének vizsgálati eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy nem sikerült 100% tisztaságú kalcitlemez mintát gyűjtenünk. Természetesen a korábbi feltételezésemmel kéz-a-kézben jár ez az eredmény is, miszerint várhatóan a Gellért táró biofilmjei anyagi összetételükben nem különböznek - általunk mérhető formában.

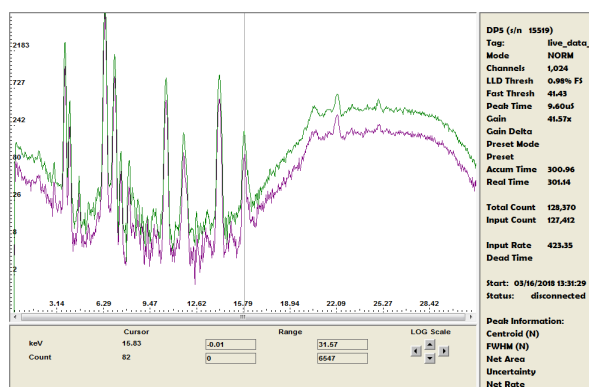
#### 5.1.4. A pasztillák geometriai viszonyainak tesztelése

##### *Első feltételezés*

Az anyagi összetétel meghatározása közben elgondolkodtam azon is, hogy a pasztillázó, a mozsár, a tárolóedény (stb.) nem tökéletesen steril volta miatt különbözőképpen betéve a pasztillát ("fejjel" lefelé vagy az élére állítva) kaphatunk-e teljesen más, vagy akárcsak lényegesen különböző eredményt.



16. ábra. A GTBP1BPN minta normál állapotban (z), elfektetve (l) és "fejjel" lefelé (k)



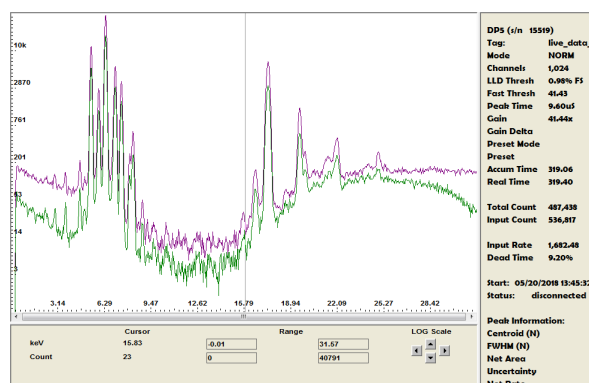
17. ábra. A GTBP1BPK minta normál állapotban (z) és "fejjel" lefelé (l)

Mindkét ábrán (16 és 17) látható, hogy a minták geometriájának nincs kihatása az anyagi összetételre, azaz nem lehetséges, hogy a minta egyik oldalán mondjuk összegyűlik az arzén, stroncium, kalcium hármas, de közben a másikon ott van mondjuk az urán vagy a mangán vagy éppen a molibdén.

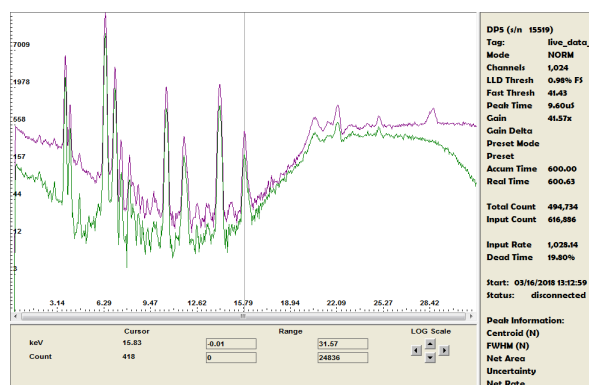
### Második feltételezés

Azonban az még elképzelhető, hogy az alacsony energiájú vizsgálati tartomány - az optimális 35 keV - miatt nem detektáltunk anyagokat, amelyeket amúgy a minta tartalmaz - habár a feltételezés jórészt kizárható azzal az indoklással, amit már a 3.2. fejezetben leírtam a különböző anyagok  $K$  és  $L$  csúcsainak össze-nem-keverhetőségével kapcsolatban, azért megvizsgáltam a teóriát.





18. ábra. A 316 SS minta 35 (z) és 50 (l) keV-es vizsgálata



19. ábra. A GTBP1BPK minta 35 (z) és 50 (l) keV-es vizsgálata

Természetesen várakozásainknak megfelelően - ahogy a 18. ábrán és a 19. ábrán is látható - azt a választ kaptuk, hogy hiába a magasabb energiájú vizsgálat, nem fogunk új, más anyagi összetevőket detektálni.

A röntgenfluoreszcencia-analízis vizsgálatok végeredményeként kijelenthetjük tehát, hogy az általunk begyűjtött, valamint a 2017-es kutatómunkából ránk maradt minták anyagi összetétele - az általunk mérhető tartományból származó anyagokat idevéve csak - kalcium, arzén és stroncium.

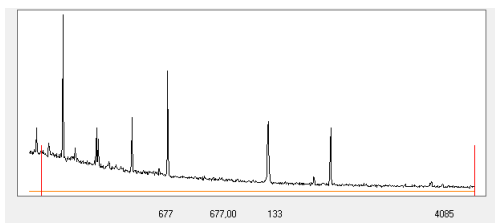
Mondanom sem kell, ahogy korábban is említettem, a mintánk ezen az anyagokon kívül - hiszen feltételezéseink és a Gellért-hegy kőzeteinek tanulmányozására irányuló korábbi geológiai kutatások szerint [21], [16], [3] a Gellért-hegy fő kőzete a triászi dolomit ( $CaMg(CO_3)_2$ , [12]) - oxigént, szenet és magnéziumot is tartalmaz.

## 5.2. $\gamma$ -spektroszkópia

Alább részletezem a  $\gamma$ -spektroszkópiás mérések eredményeit, amely a minták aktivitását határozza meg. A  $\gamma$ -spektrumok kiértékelését a *SPILL 5.2* nevű programmal végeztem. A hatásfokokat a Szono-centrum (HPGe-Labor) számítógépén megtalálható *Hatasfok* elnevezésű programmal számoltam.

### 5.2.1. HPGe detektor spektrumok

A kiértékelés folyamata közben közel azonos spektrumokat kaptunk minden mintára - szemre közel azonosak - így azokból csak egyet közlök (20.ábra), viszont a ?? táblázat tartalmazza a kiértékelt mintákat, valamint a 186 keV energiához tartozó csúcsaik területét és az érték hibáját.



20. ábra. A GTAB4 minta  $\gamma$ -spektroszkópiás vizsgálatának spektruma

A minta neve	Terület
GTA1	$1818 \pm 72$
GTA3	$2500 \pm 85$
GTA4	$829 \pm 56$
GTAB1	$4767 \pm 142$
GTAB2	$4604 \pm 137$
GTAB4	$5330 \pm 135$
GTBP1AM	$2112 \pm 71$
GTBP1BPK	$584 \pm 34$
GTBP1BPN	$1248 \pm 63$

3. táblázat. A minták 186 keV energiához tartozó csúcsainak területe

### 5.2.2. Hatásfok és Fajlagos aktivitás

A hatásfok kiszámolásához először meg kell határozzuk a mért mintáink sűrűségét:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{r^2 * \pi * h} \quad (6)$$

ahol  $m$  a minta tömege,  $V$  a minta térfogata,  $r$  a kör alau küvettában lévő minta sugara,  $h$  pedig a minta magassága (az adatokat ld.: 4.1. fejezet).

A minta neve	Sűrűség ( $\frac{g}{cm^3}$ )
GTA1	0,3545
GTA3	0,4863
GTA4	0,2854
GTAB1	0,6266
GTAB2	0,6355
GTAB4	0,3096
GTBP1AM	0,5472
GTBP1BPK	1,9990
GTBP1BPN	1,5874

4. táblázat. A minták sűrűsége

A 4.táblázatban az adatok negyedik tizedesjegyre kerekítve szerepelnek.

Következő lépésben megpróbáljuk az RFA-mérésnél meghatározott anyagi minőség alapján meghatározni a mintáink elemi összetevőit (ld.: 5.1. fejezet). Ha ez megvan, meghatározzuk az elméleti molekulánk moláris tömegét, valamint az egyes komponensek rend- és darabszámát.

Így már mindent tudunk ahhoz, hogy kiszámolhassuk a mintáink hatásfokát. Ehhez a korábban említett *Hatasfok* nevű programot használtam. A program bekéri az adott minta magasságát (cm-ben), átmérőjét (cm-ben), sűrűségét (g/cm<sup>3</sup>-ben), az elemi összetevők rendszámát és darabszámát, a minta elemi összetevőiből gyártott elméleti molekula moláris tömegét (g/mol-ban) valamint a mérni kívánt energiákat (MeV-ben). Illetve természetesen a lépésszámot.

Utána a program számol, ez eltarthat pár percig, főleg ha szeretnénk, hogy a hatásfok - amelynek egyébként a 10000-szeresét számolja a program - hibája 1% alá csökkenjen, és nekünk ez volt a célunk. Ha megvan az érték - és természetesen elmentettük a fájlt - akkor mehet a következő minta mérése,

szerencsére a program az összes kívánt energián egyszerre végzi a számolást, így nekünk csak várni kell, illetve a kapott eredményt osztani 10000-el.

Mivel nem tudjuk pontosan, hogy milyen elemi összetevőink vannak, valamint azok mennyiségét sem tudjuk pontosan, ezért többféle megoldással kísérletetünk, de természetesen felhasználjuk az 5.1. fejezetben kapott eredményeket.

Ekkor a többféle elemi összetétel közül az - vagy azok - lesz(nek) a megfelelő(ek), amely(ek) fajlagos aktivitása a két majdnem azonos tulajdonsággal rendelkező mintánk esetén - a GTBP1BPN és a GTBP1BPK, mely mindkettő ugyanabból a mintából készült, eltérő magasságú és sűrűségű pasztilla - egymástól kevesebb, vagy maximum picit több, mint 10%-ban tér el.

Ez az alábbi három összetétel lett - az elméleti összegképlet mellett a két pasztillára kapott fajlagos aktivitás értékek százalékos értékének eltérését is közöljük:

- $CaMg(CO_3)_2As_{0.5}Sr$ , az eltérés 8.95%
- $CaMg(CO_3)_2AsSr_{0.5}$ , az eltérés 10.5%
- $CaMg(CO_3)_2$ , az eltérés 13.2%

Tehát a feltételt leginkább kielégítő összetétellel kiszámoljuk a hatásfokot a többi mintánkra is. A táblázatban azért a korábban említett két minta eredményeit is közlöm, mind a három vizsgált összetételre. (ld.: 5. táblázat). A táblázatban az egyszerűség kedvéért a  $CaMg(CO_3)_2$  elemösszetétel részletet nagy  $W$ -vel helyettesítettem.

A minta neve	$WAs_{0.5}Sr$	$W$	$WAsSr_{0.5}$
GTBP1BPK	$0.2371 \pm 0.946\%$	$0.2466 \pm 0.948\%$	$0.2373 \pm 0.884\%$
GTBP1BPN	$0.1683 \pm 0.959\%$	$0.1802 \pm 0.977\%$	$0.1686 \pm 0.963\%$
GTA1	$0.1424 \pm 0.816\%$	-	-
GTA3	$0.1300 \pm 0.699\%$	-	-
GTA4	$0.2202 \pm 0.635\%$	-	-
GTAB1	$0.1308 \pm 0.758\%$	-	-
GTAB2	$0.1106 \pm 0.882\%$	-	-
GTAB4	$0.1012 \pm 0.795\%$	-	-
GTBP1AM	$0.2088 \pm 0.585\%$	-	-

5. táblázat. A minták hatásfoka és a hatásfok hibája %-ban

A határfokok a negyedik tizedesjegyre kerekítve szerepelnek a táblázatban.

A határfokok meghatározása után a továbblépéshez felhasználjuk a 5.2.1. fejezetben kimért területeket és folytathatjuk is a számolásunkat, melyet a 3.1. fejezetben részleteztem.

A kívánt aktivitás értékek meghatározása után (ld.: 6. táblázat), a fajlagos aktivitás értékét az alábbi képlet segítségével kapjuk:

$$A_{fajlagos} = \frac{A_m}{m} \quad (7)$$

ahol  $m$  a minta tömege,  $A_m$  pedig a megmért aktivitás értéke. A fajlagos és mért aktivitásokat az alábbi, 6. táblázat tartalmazza.

A minta neve	Aktivitás Bq	Fajlagos aktivitás Bq/g
GTA1	4.505 ± 0.1784	0.948 ± 0.1784
GTA3	6.786 ± 0.2307	0.9476 ± 0.2307
GTA4	1.329 ± 0.0897	1.0371 ± 0.0897
GTAB1	12.8602 ± 0.3803	1.5235 ± 0.3803
GTAB2	14.689 ± 0.4371	1.3038 ± 0.4371
GTAB4	18.5849 ± 0.4707	2.599 ± 0.4707
GTBP1AM	3.5692 ± 0.1200	1.3121 ± 0.1200
GTBP1BPK	0.8691 ± 0.05	1,73 ± 0.05
GTBP1BPN	2.6166 ± 0.132	1.549 ± 0.132

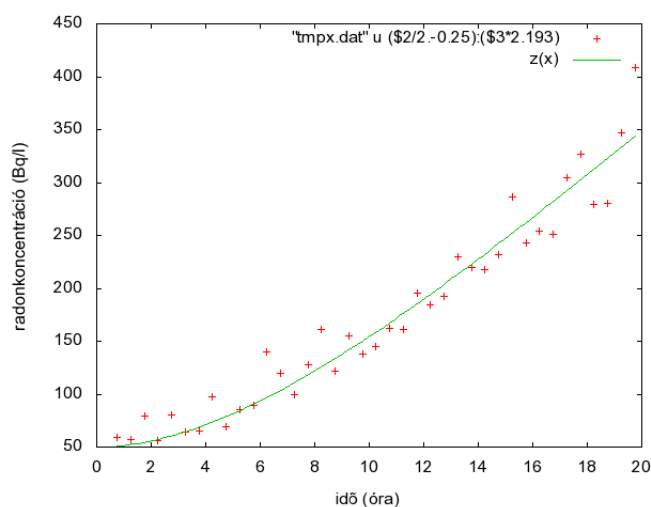
6. táblázat. A minták aktivitása és fajlagos aktivitása

A fajlagos aktivitásnál azért szereplnek az aktivitással azonos hibaértékek, mivel a tömegmérés hibája - az analitikus mérlegnek köszönhetően - elhanyagolható (ld.: 4. fejezet).

### 5.3. Folyadékszintillációs spektroszkópia

Most pedig tárgyalom a folyadékszintillációs spektroszkópia mérés eredményeit, amely nem más, mint a radon exhalációs érték (ld.: 3.3. fejezet).

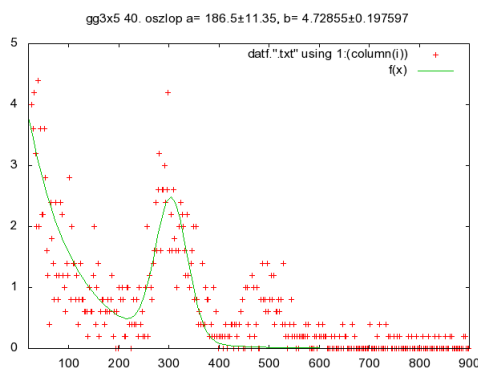
A 3.3. fejezetben tárgyaltak szerint kimért időfüggés látható az alábbi 21. ábrán.



21. ábra. A GTA1 minta mért radonkoncentrációjának időfüggése

A minta a GTA1 minta volt, melyből 2g-ot helyeztünk el a küvettában és 40 \* 30 percig mértük.

A következő ábrán látható a GTA1 minta, utolsó - a 40. - félórás mérésének fényhozam spektruma. A görbét a 3.3. fejezetben tárgyaltak alapján illesztettük a kapott mérési eredményekre.



22. ábra. A GTA1 minta 40. fényhozam spektruma

A minta radonexhalációját az alábbi képlettel tudjuk kiszámítani:

$$E = A * \frac{\alpha}{\beta} * V \quad (8)$$

ahol A a görbe illesztési paramétere, V a minta térfogata,  $\alpha$  és  $\beta$  pedig a 3.3. fejezetben tárgyalt értékek.

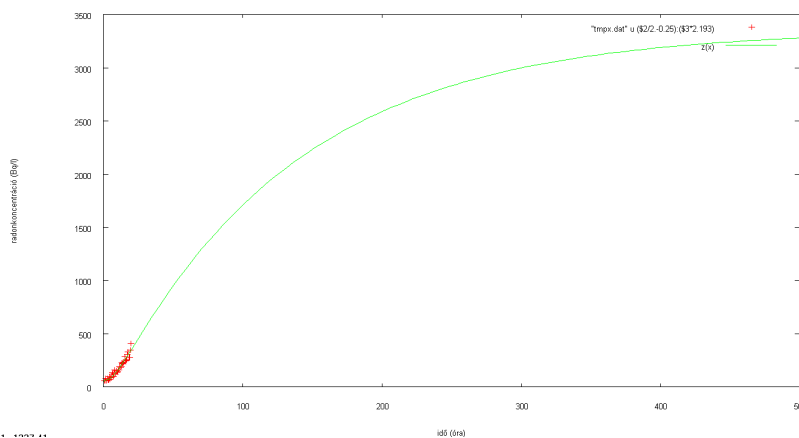
Tehát a vizsgált minta exhalációs értéke - az illesztett paramétereket valamint a radon felezési idejét beírva az egyenletbe:

$$E = 33 \pm 10 \frac{1}{s} \quad (9)$$

Azonban a mi mintánk két gramm volt, tehát a minta fajlagos exhalációja:

$$M = \frac{E}{m} = 16,5 \pm 5 \frac{1}{sg} \quad (10)$$

Érdekességképpen megnéztük, hogy mit jósol az egyenlet, hogyha a mintánkat két hétig mérnénk. Az eredmény a 23. ábrán látható.



23. ábra. A radonkoncentráció növekedése két hét alatt

## 6. Diszkusszió

Méréseinkkel igazoltuk a kezdeti feltevésünket, miszerint a biofilmek közvetlenül felelősek a Gellért-hegyi radonanomália kialakulásában, magas rádiumtartalmuknak és radonexhalációs értéküknek köszönhetően.

Tisztáztuk, hogy a minták elemi összetétele területenként nem eltérő, tehát a különböző területek eltérő radon- és rádiumtartalmát nem a biofilmek különbözősége okozza - természetesen a kérdés pontos megválaszolása még további vizsgálatok szükségességét követeli meg.

Leírtuk, hogy hogyan lehet szilárd mintával történő folyadékszintillációs mérés során a kapott cpm értékeket  $\text{Bq L}^{-1}$  értékévé konvertálni, ehhez előállítottunk egy speciális Gauss függvényt, valamint az exhaláció értékének kiszámolását is módosítottuk a folyadékminták során történő exhaláció számolás képletéhez képest.

Megvizsgáltuk a minták fajlagos aktivitását és ennek okán több elképzelhető elemi összetételű molekulát leírtunk, amelyekre az elvárt hibahatáron belüli a különböző minták fajlagos aktivitásának aránya. Sajnos további vizsgálódásra ez irányban nem maradt időnk, de biztosan érdekes eredményeket lehetne kapni pontosabb, mennyiségi RFA-analízis valamint utána egy pontosabb határfok számolással.

Az exhaláció kiértékelésénél is leírtuk, hogy az általunk előállított egyenlettel megjósoltuk egy kéthetes mérés várható eredményét, azonban elvégezni nem volt időnk, viszont ezeket a későbbiekben megcsinálva érdekes eredményekre lehet bukkani, amikor az elméleti görbétől majd eltérnek a mért értékek, természetesen ez azt jelenti, hogy lehet módosítani a Gauss függvényt, azzal együtt pedig az exhalációt kiszámoló képletet is.

Illetve szintén érdekes kutatási terv lehet, hogy ugyanezt a mérésorozatot elvégezni egy sokkal tágabb területről begyűjtött mintakollekcióval, vizsgálván, hogy nincs-e esetleg a biofilmek anyagában változás nagyobb területenként.

Ugyancsak érdekességképpen még meg lehet ejteni a minták vizsgálatát a kisebb energiatartományon mérő szilícium-lítium (Si-Li) detektorral is, hiszen a kisebb vizsgálati tartomány eredményezhet pontosabb mérési eredményeket a vizsgált tartományban, ezáltal például pont az általunk előszeretettel vizsgált 186 keV energiájú csúcs adatait - területe, helye - lehetne még pontosabban meghatározni.



## 7. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a sok segítséget és közös éjjeli labormunkákat, a számtalan tanácsot és okítást témavezetőmnek, Dr. Horváth Ákosnak.

A sok támogatást, ösztönzést, kiabálást, együttérzést és lelkielő-kölcsönzést páromnak, Sudár Mariannak.

Szeretném megköszönni továbbá anyukámnak a finom vacsorákat és főleg a sütitket, amelyek az éjszakai munkák során biztosították a megfelelő erőforrásaim utántöltését, Farkas Ritának a hasznos Latex tippeket és nagybátyámnak, amiért biztosított számomra egy használható laptopot.

Valamint szeretném megköszönni Dr. Pávó Gyulának, hogy megosztotta velem a laborokban található műszerek leírásában meg nem található - avagy jól elrejtett - trükkjeit.

Végezetül szeretném megköszönni mindenkinek a sok bátorítást, aki az elmúlt négy hónap során a dolgozat elkészítése közben nem hagyta, hogy feladjam.

## Irodalomjegyzék

- [1] Alföldi L., Béteky L., Böcker T., Horváth J., Kessler H., Korim K., Oravecz J., Szalontai G.: Budapest hévizei.  
*1968 - Vízgazdálkodási Tudományos Kutatóintézet, Budapest*
- [2] Blázsovcics Péter: Potenciális rádium-források vizsgálata a Molnár János-barlangban  
*Diplomamunka, 2017 - ELTE TTK Környezettudományi Centrum, Budapest*
- [3] Dr. Korpás L., Dr. Fodor L., Dr. Magyarai A., Dr. Gyénes D., Dr. Oravecz J.: A Gellért-hegy földtana, karszt- és szerkezetfejlődése  
*1998-1999. - Karszt és Barlang, pp. 57-93*
- [4] ELTE TTK Atomfizikai tanszék: FSS - Folyadékszintillációs spektroszkópia  
*Mérésleírás 2018. március 25. - ELTE TTK Alkalmazott fizikai módszerek laboratórium*
- [5] ELTE TTK Atomfizikai Tanszék: GAM - Gamma spektroszkópia  
*Mérésleírás, 2018. április 9. - ELTE TTK Alkalmazott fizikai módszerek laboratórium*
- [6] ELTE TTK Atomfizikai tanszék: A karakterisztikus röntgensugárzások energiatablázata  
*Táblázat, 2018. március 31. - ELTE TTK Környezetfizikai laboratórium*
- [7] ELTE TTK Atomfizikai Tanszék: A  $^{238}\text{U}$  és a  $^{232}\text{Th}$  bomlási sorának 0,001 relatív intenzitás feletti gamma-bomlásai  
*Táblázat, 2018. május 29. - ELTE TTK Sugárzások fizikája laboratórium*
- [8] ELTE TTK Atomfizikai Tanszék: REX - Radon exhaláció mérése  
*Mérésleírás, 2018. március 25. - ELTE TTK Sugárzások fizikája laboratórium*
- [9] ELTE TTK Atomfizikai Tanszék, Tricarb 1000 TR: Vízminták radontartalma meghatározásának elvi alapjai  
*Mérésleírás, 2018. március 26. - ELTE TTK Atomfizikai Tanszék, műszerek*
- [10] ELTE TTK Atomfizikai Tanszék: Vízminták radontartalmának vizsgálata

*Mérésleírás, 2018. március 28. - ELTE TTK Környezetfizikai laboratórium*

- [11] Eröss A., Mádl-Szőnyi J., Surbeck H., Horváth Á., Goldscheider N., Csoma A.: Radionucleides as natural tracers for the characterization of fluid in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary  
*2012 - Journal of Hidrology pp. 124-137*
- [12] Géber Róbert: Mészköliszt és dolomit töltőanyagok hatása aszfalthabarcok reológiai tulajdonságaira  
*Doktori (Ph.D.) értekezés, 2012 - Kerpely Antal Anyagtudományok és technológiák Doktori Iskola*
- [13] Horváth Ákos (és részben Pávó Gyula): Röntgenfluoreszcencia analízis  
*Mérésleírás, 2017. november - ELTE TTK Modern fizika laboratórium*
- [14] Kasztovszky, Zs., Kuczi, R., Szerbin, P.: On the Natural Radioactivity of Waters in Hungary  
*1996 - Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine 2/4, pp. 335-347.*
- [15] Kiss Rózsa: Talajvizek radonkoncentrációjának mérése és környezeti hatásainak tanulmányozása  
*Diplomamunka, 1998 - ELTE TTK Matematika-fizika-tanár*
- [16] Kriston Gábor: Gellért-hegy dolomit sziklafalának veszélyességének vizsgálata  
*TDK Kutatómunka, 2017.10.26. - Tudományos Diákköri Konferencia*
- [17] Kurcz Regina: Radionukleidok a Budai-hegység északi részének felszín alatti vizeiben  
*Diplomamunka 2014- ELTE TTK Környezettudományi Centrum, Budapest*
- [18] Kürti Jenő: A. Függelék: Atomspektroszkópia  
*Mérésleírás függelék, 2013. április - ELTE TTK Modern fizika laboratórium*
- [19] Országos Gyógyszerészeti és Élelmezés-egészségügyi Intézet: Paraffinum Solidum  
*OGYEI közlemény, 01/2008:1034 - Ph.Hg.VIII. - Ph.Eur.6.0 - 1*
- [20] Palotai Márton, Mádlné Szőnyi Judit, Horváth Ákos: A budapesti Gellért- és a József-hegy felszín alatti vizeiben mért radon- és

rádiumtartalom lehetséges forrásai

2005 - *Általános Földtani Szemle* 29, 25-40., Budapest

- [21] Palotai Márton, Mindszenty Andrea, Kopcsekó Katalin, Poros Zsófia:  
Az Ínség-kő geológiája  
2012- *Földtani Közlöny*, 1. kötet 142/3, pp. 243-250.
- [22] Sonzogni, Alejandro: NuDat 2.7  
*Interactive Chart of Nucleides*, 2018. május 5. - NNDC, Brookhaven National Laboratory
- [23] Resch Anita: A Gellért-hegyi radonanomália vizsgálata  
*Diplomamunka*, 2009 - ELTE TTK Könyvtudományi Centrum
- [24] Weszelszky Gy.: A budapesti hévizek radioaktivitásáról és eredetéről  
1912 - *Matematikai és Természettudományi Értesítő*, **XXX.**, 340-381.
- [25] Weszelszky Gy.: A budapesti hévizek rádiumemanációtartalmának eredetéről  
1937 - *Hidrológiai Közlöny*, **XVI**, 5-16.